

# 学 位 論 文 の 要 旨

## Study of High Efficiency and Low Input Voltage Power Conversion Circuits for Energy Harvesting Applications

( エナジーハーベスト応用のための高効率・低入力電圧電源回路の研究 )

氏 名    NOSKER Zachary Zehner    印

This paper describes a circuit that will operate from a low input voltage, attain a high peak efficiency, and be capable of handling a realistic load current. There have been a number of papers published recently related to energy harvesting technology. While these have shown that energy can be harvested from micro-power sources in the natural environment, they tend to have very low conversion efficiency and cannot support a realistic output load. This paper presents a circuit which can improve upon these existing technologies.

Electrical energy is necessary for nearly every aspect of our modern lives. New technologies like cloud storage require massive server farms and an increased electrical demand from the grid. Battery-powered mobile devices like smartphones have become necessary for everyday life, since no one ever wants to be out of communication range of their friends or colleagues for more than a few minutes. But the electricity required to power these server farms or charge batteries comes at a cost of creating CO<sub>2</sub> and contributing to global warming. While there have been a number of ways proposed to counteract or limit the effect of global warming, one promising way of generating free energy is in the area of Energy Harvesting.

Energy harvesting offers a chance to change the way we think about energy. By using transducers that capture energy from “free” sources in the ambient environment, slight amounts of energy can be harvested in order to power real systems. There are many ways that micro-power transducers could be used in energy harvesting systems. A piezoelectric or vibrational transducer attached to a bridge could be used to power a sensor grid. Thermal or vibrational transducers in implanted medical devices could reduce the dependence on invasive surgeries used to change batteries. Additionally, micro solar cells could be used to power watches or add power to cell phones. In all of these examples, energy harvesting offers a way to reduce our dependence on

conventional energy sources. If they are added to mobile devices, these systems could add trickle-charge to batteries and increase the amount of time a device can be used between charging. While this effect will probably be transparent to the user, the increase in battery life can have a significant impact on the perceived quality of a mobile device.

Based on these backgrounds, this paper introduces a small, low power bootstrapped boost regulator that can start up with an input voltage of 240 mV and achieve a maximum efficiency of 97%. The proposed circuit uses two separate control schemes for startup and steady-state operation. A fixed-frequency oscillator is used to initially start up the circuit and raise the output voltage. Once the output voltage has reached a level adequate to bias the internal circuitry, a constant-on-time style hysteretic control scheme is used to regulate the output voltage. This hysteretic control scheme helps increase system efficiency compared to using conventional Pulse-Width-Modulated control. While maintaining a high efficiency, the proposed circuit is implemented using only three external components: two capacitors (input and output) and an inductor. The effectiveness of this approach is shown through Spectre simulation results. Additionally, a test chip consisting of the startup charge pump was taped out and evaluated on the lab bench. Characterization shows that this subsystem functions correctly and that it will be able to power the drivers and output switches when the full chip is taped out together.

Compared to other papers that have been recently published in the area of energy harvesting power management circuits, the proposed circuit operates with a high efficiency (>90%), is capable of driving a realistic load (5mW) and does not require any external bias voltages, large external components or energy storage devices. The high efficiency of my proposed circuit ensures that the maximum amount of energy from an input transducer will be available for the load circuitry. Additionally, the extended 5 mW load range makes this regulator able to drive a realistic load, like a Micro Controller Unit (MCU) connected to a wireless transceiver subsystem. While other circuits have been proposed for energy harvesting power management, their low efficiency and low maximum load capability make them impractical for powering realistic systems. The proposed circuit with new ideas can solve these problems.

(和訳)

この論文ではエネルギーハーベスティング技術分野で既存の技術を改善するために、高いピーク効率を達成し現実的な負荷電流を処理できる低入力電圧で動作する回路を作成した内容を記述した。

最近、多くのエナジーハーベスティング技術に関する論文が出されている。エネルギーは、自然環境におけるマイクロパワー源から採取されているが示されているが、非常に低い変換効率を有する傾向があり、現実的な出力負荷をサポートすることができない。この論文ではこの問題を解決するための回路を記述した。

電気エネルギーは、現代の生活において必要不可欠なものである。クラウドストレージのような新しい技術は、大規模なサーバファームとグリッドから増加した電気が必要となる。スマートフォンのようなバッテリー駆動のモバイル機器は、毎日の生活の必需品となってきた。しかし、電気はサーバファームや充電バッテリーに電力を供給する同時に、CO<sub>2</sub>を生成し、地球温暖化を加速させる。地球温暖化の影響を防止するためにいくつかの方法が提案されたが、1つの有望な方法は自由エネルギーを生成することである。それはエナジーハーベスティングの領域にある。

エナジーハーベスティングは、我々がエネルギーについての考え方を変えるきっかけとなる。変換器を使用し、その周囲環境の「フリー」のソースからのエネルギーを得ることによって、わずかなエネルギー量で実際のシステムの中に電力を供給することができる。マイクロパワー変換器がエナジーハーベストシステムで使用される例は多い。ブリッジに取り付けられた圧電または振動変換器は、センサー・グリッドに電力を供給することができる。植込み型医用機器の電池を交換することより、熱や振動変換器は、侵襲的手術への依存を減らすことができる。さらに、マイクロ太陽電池は、時計や携帯電話の電源として使用される。これらの例のように、エナジーハーベスティングによって、従来のエネルギー源への依存を軽減できる。もしこれらのシステムがモバイルデバイスに適用されると、バッテリーにトリクル充電ができるようになり、デバイスを使用できる時間が延びる。この効果はユーザーにわかりやすいが、バッテリーの寿命の増加はモバイルデバイスの感覚的な品質に大きな影響がある。

本論文ではエナジーハーベスティング分野に貢献するために小型で低消費電力のブートストラップ昇圧レギュレータを開発した内容を記述した。この提案レギュレータは、240mVの入力電圧で起動し、97パーセントの最大効率を達成することができる。提案する回路は、起動時と定常運転の2つの別々の制御方式を使用している。固定周波数発振器は、最初の回路起動および出力電圧を上昇させるために使用されている。出力電圧が一度内部回路をバイアスするための十分なレベルに達すると、コンスタント・オンタイム・スタイルヒステリシス制御方式によって出力電圧が安定化される。従来のパルス幅変調制御に比べると、このヒステリシス制御方式はシステム効率を上げることができる。また本回路は、外付け部品はわずか3個（入力および出力の2つのコンデンサとインダクタ1つ）の実装で高効率を維持できる。このアプローチの有効性を確認するため、回路シミュレーションで検証を行った。さらに、スタートアップチャージ・ポンプからなるテストチップをテープアウトし、評価を行った。特性評価から見て、このサブシステムが正しい機能を示し、フルチップと一緒にテープアウトされたときに、ドライバと出力スイッチに電力を供

給することができる。と予見できる。

他のエネルギーハーベスティングパワーマネジメント回路の分野で最近公表されている論文に比べて、提案した回路は、高効率で動作し ( $>90\%$ )、現実的な負荷 ( $5\text{mW}$ ) を駆動することが可能であり、任意の外部バイアス電圧、エネルギー蓄積装置、大きな外部コンポーネントが必要はない。私が提案した高効率回路は、入力変換器から受け取る最大量のエネルギーを負荷回路に利用できる。さらに、拡張された  $5\text{mW}$  の負荷範囲により、無線送受信サブシステムに接続されたマイクロコントローラユニット (MCU) のように、このレギュレータを現実的な負荷で駆動することができる。他の回路はエネルギーハーベスティング電力管理として提案されてきたが、効率と最大負荷能力が共に低いので、現実的なシステムの電力において非実用的である。私の提案した回路はいくつかの新しいアイデアを盛り込み、従来の問題を解決している。